

Comportamiento resistente de revestimientos de túnel de anillos de dovelas prefabricadas de hormigón



Oriol Arnau

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Universitat Politècnica de Catalunya



Climent Molins

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Universitat Politècnica de Catalunya

Resumen

Este artículo presenta los resultados de una investigación llevada a cabo en el ámbito de la respuesta resistente de los revestimientos de túneles a base de anillos de dovelas prefabricadas de hormigón. La investigación arrancó con la realización de una prueba de carga in situ sobre un tramo experimental ubicado dentro de la línea 9 del Metro de Barcelona. Las conclusiones obtenidas sobre su comportamiento permitieron desarrollar modelos de simulación numérica tanto 2D como 3D bien contrastados con los resultados experimentales del ensayo. Esta investigación también incluye el estudio del comportamiento longitudinal del revestimiento, donde se determina hasta qué punto la compresión longitudinal inicialmente introducida por la tuneladora se va disipando en el tiempo por efecto de la fluencia del revestimiento, lo que condiciona la capacidad de interacción longitudinal entre anillos sucesivos. Finalmente, se presentan las implicaciones en el diseño del revestimiento resultado de tener en cuenta su respuesta 3D, tanto a acciones típicas de proyecto, que suelen ser repartidas, como ante acciones puntuales, que se producirían en condiciones especiales o accidentales.

Palabras clave

Revestimiento de túnel, respuesta resistente, ensayo in situ, análisis estructural, simulación numérica

1. Introducción

La utilización de máquinas tuneladoras para la construcción de túneles se ha incrementado de forma notable en los últimos años debido a las numerosas ventajas que presenta frente a los métodos tradicionales de perforación. Este sistema permite la construcción de túneles bajo grandes presiones de tierras y agua, las cuales deben ser satisfactoriamente resistidas por un revestimiento estructural. Estos nuevos escenarios producen unas mayores solicitaciones estructurales sobre dicho revestimiento, convirtiendo a su diseño en uno de los puntos clave en todo proyecto de túnel.

Load-bearing capacity of precast concrete segmental tunnel linings

Abstract

This article presents the results of research carried out in the field of the structural response of tunnel linings made of precast concrete segments. The investigation began with the realization of a load test on a site located within an experimental section line 9 of the Barcelona Metro. The conclusions drawn about its behavior allowed the development of numerical models, both 2D and 3D, validated with the experimental results. This research also includes the study of the longitudinal behavior of the lining in order to determine the extent to which longitudinal compression initially introduced by the TBM is dissipated over time due to the influence of lining creep, which determines the longitudinal interaction between adjacent rings. Finally, the effect on the segmental lining design of taking into account its 3D response subjected to both, typical distributed design loads, or localized actions that would occur in special or accidental conditions is appraised.

Keywords

Tunnel lining, structural response, on-site testing, structural analysis, numerical simulation

1. Introduction

There has been a considerable increase in the use of TBM's to construct tunnels over recent years due to the numerous advantages these offer over traditional boring methods. This system allows the construction of tunnels under large earth and water pressures, which then have to be borne by a structural lining. These new scenarios produce greater structural stress on this tunnel lining and subsequently makes their design one of the key elements of all tunnel projects.

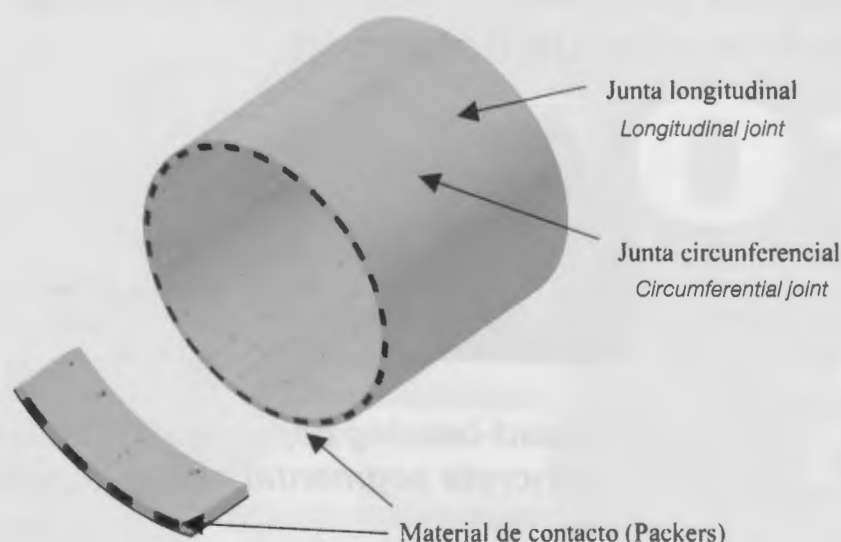


Fig. 1. Revestimiento de túnel a base de dovelas prefabricadas de hormigón/Prefabricated concrete segmental tunnel lining

El revestimiento se va construyendo en el interior de la tuneladora a medida que esta avanza, permitiendo proceder de la forma más segura posible a la contención de las tierras y el agua, al mismo tiempo que sirve de marco de reacción para que la tuneladora pueda ejercer su avance. Los revestimientos de túneles a base de dovelas se componen de varias piezas de hormigón prefabricadas que conforman un anillo, el montaje sucesivo de los cuales acaba formando la totalidad del revestimiento (Fig. 1).

Esta particular configuración genera una respuesta estructural condicionada por múltiples fenómenos complejos como el comportamiento de las juntas, los materiales de contacto dispuestos en ellos o de la interacción terreno-estructura [1, 2, 3]. La bibliografía y la práctica habitual presentan significativas lagunas a la hora de considerar adecuadamente dichos fenómenos en el análisis estructural de los revestimientos, siendo habitual aplicar simplificaciones de anillo aislado y continuo con propiedades elásticas. Por consiguiente, se pone de relieve el gran interés por el desarrollo de investigación en este ámbito, ya que la mejora del conocimiento de la respuesta estructural de los revestimientos permitirá optimizar los procesos de diseño y ofrecer un producto más seguro a un coste ajustado.

El trabajo aquí expuesto responde a un ambicioso plan de investigación planteado con el fin principal de incrementar el conocimiento sobre la respuesta estructural de los revestimientos de túneles realizados a base de dovelas

The lining is built within the interior of the TBM as the machine advances, in this way serving as the safest means of retaining earth and water while also providing a reaction frame to allow the advance of the TBM. Segmental tunnel linings are formed by various precast concrete sections to form a ring and where the successive assembly of the same serves as the complete lining (Fig. 1).

This particular arrangement generates a structural response that is conditioned by a multitude of complex factors such as the behaviour of the joints, the packing material used at the same or the soil-structure interaction [1, 2, 3]. However, there are significant gaps in the literature on the subject and in standard practice regarding the correct consideration of these factors in the structural analysis of linings, and where it is more common to apply simplifications in the form of an isolated and continuous ring with elastic properties. This then underlines the growing need for further research in this area, as a better knowledge of the structural response of the linings would improve the design process and provide safer products at more reasonable cost.

The work described in this article corresponds to an ambitious research plan that primarily sets out to increase our knowledge with respect to the structural response of prefabricated segmental tunnel linings. To this effect, theoretical studies and experimental testing have been conducted together with advanced numerical simulations which have been seen to provide innovative and relevant conclusions in the field of tunnel structures.

The research started out with the design of an innovative test that would provide realistic data of the structural response of this type of

prefabricadas. A tal efecto se han llevado a cabo tanto estudios teóricos, como ensayos experimentales, como simulaciones numéricas avanzadas, que han permitido alcanzar conclusiones innovadoras y relevantes en el ámbito de las estructuras de túneles.

La investigación partió del diseño de un ensayo innovador que permitiera obtener de forma realista la respuesta estructural de esta tipología de revestimiento en sus condiciones reales de trabajo. A partir de los conocimientos obtenidos en el ensayo, se determinaron los principales fenómenos que influyen en la respuesta estructural de los revestimientos y se desarrollaron técnicas de modelización numérica destinadas a reproducirlos de forma fidedigna. La adecuación de los modelos planteados se contrastó mediante la simulación numérica del ensayo, obteniendo un excelente nivel de precisión con respecto a los resultados experimentales.

Un segundo bloque de la investigación se ha centrado en la determinación de la respuesta tridimensional del revestimiento. Debido a la particular configuración de las juntas entre anillos (juntas circunferenciales), el nivel de la fuerza longitudinal que permanece en el túnel condiciona el nivel de interacción entre anillos adyacentes y, por lo tanto, la capacidad de reparto longitudinal o, lo que es lo mismo, el grado de tridimensionalidad de la respuesta. El estudio de los mecanismos longitudinales de transmisión de fuerzas ha permitido determinar los fenómenos que condicionan su evolución y, en base a estos, proponer formulaciones que permitan predecir la reducción que experimenta la fuerza longitudinal a lo largo del tiempo.

El conocimiento adquirido en este punto permitió la realización de modelos tridimensionales de elementos finitos capaces de reproducir de forma realista la respuesta estructural del revestimiento y, por consiguiente, analizar su comportamiento en distintas condiciones de carga, terreno envolvente y nivel de fuerza longitudinal. Este análisis ha permitido obtener significativas conclusiones sobre la tridimensionalidad de la respuesta estructural de los revestimientos de túnel realizados a base de dovelas prefabricadas, definiendo las condiciones en que se producen efectos significativos de acoplamiento entre anillos, las consecuencias de su no consideración en fase de diseño, y los modelos simplificados más adecuados para ser usados en dicha fase, evitando posibles defectos producidos por su no inclusión.

lining under real working conditions. From the information obtained from testing, it was possible to establish the main factors influencing the structural response of linings and numerical modelling techniques were then developed to reproduce the same in a faithful manner. The suitability of the considered models was then compared by the numerical simulation of the test and showed an excellent degree of accuracy with respect to the test results.

A second area of research focused on the determination of the three-dimensional response of the lining. Due to the particular arrangement of the joints between rings (circumferential joints), the level of longitudinal force that remains in the tunnel conditions the degree of interaction between adjacent rings and, subsequently, the longitudinal distribution capacity or, what is the same, the three-dimensional level of response. The study of longitudinal stress-transfer mechanisms has made it possible to determine the factors conditioning the development of the same and has given rise to formulations to forecast the reduction in longitudinal stress over time.

The knowledge gained in this respect has made it possible to create three-dimensional finite element models capable of realistically reproducing the structural response of the lining and, subsequently, enabling the analysis of the lining behaviour under different loading, surrounding soil and longitudinal force conditions. This analysis has provided significant conclusions on the three-dimensionality of the structural response of precast segmental tunnel linings, defining the conditions under which significant coupling effects occur between rings, the consequences of ignoring these in the design stage, the most suitable simplified methods that may be used at this stage, and the prevention of possible defects caused by the failure to incorporate the same.

2. On-site testing on line 9

In order to obtain clear test evidence of the real structural response of tunnel linings, an on-site test was carried out in a test section on Line 9 of the Barcelona metro [4.5]. The main feature of the test was that it was carried out on a ring set in its final position within the tunnel, thereby eliminating the main obstacle posed in previous tests conducted in laboratories where it was not possible to consider the real soil-structure interaction [2.5].

The test has three main objectives: 1) to develop and apply a new technique for the testing of tunnel linings that takes into account all the conditioning factors, 2) to obtain test evidence of the structural response of linings in on-site conditions, and 3) establish the viability of the use of steel fibres as the only reinforcement for the concrete segments.

The tunnel lining rings on the L9 are formed by eight 350 mm thick segments (7+K), which form an external ϕ -diameter of 11.6m (Fig.

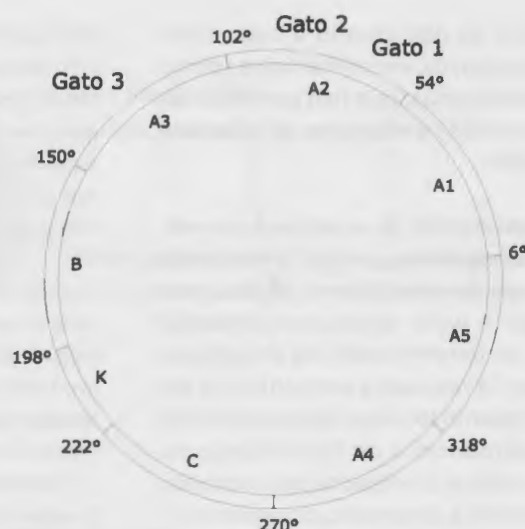
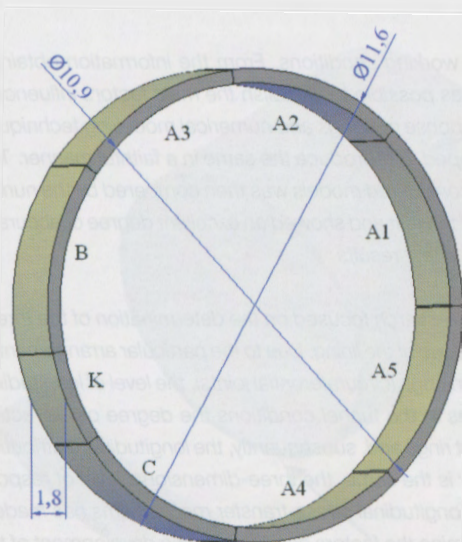


Fig. 2. Esquema de la configuración del anillo cargado en el tramo 4a de la Línea 9 (dimensiones en m)/
Diagram of the loaded ring arrangement on section 4a of Line 9 (dimensions in m)

2. Ensayo in situ línea 9

A fin de poder obtener evidencias experimentales claras de la respuesta estructural real presentada por los revestimientos de túneles, se llevó a cabo un ensayo in situ sobre un tramo experimental de la línea 9 del Metro de Barcelona [4,5]. La particularidad principal del ensayo es que se llevó a cabo sobre un anillo ubicado en su posición definitiva dentro del túnel, salvando de esta forma la limitación principal presentada por las experiencias previas realizadas, que no podían considerar la interacción terreno-estructura real al realizarse dentro de laboratorios [2,5].

El ensayo presentaba tres objetivos principales: 1) desarrollar y aplicar una nueva técnica para ensayar revestimientos de túneles teniendo en cuenta todos sus condicionantes, 2) obtener evidencia experimental de la respuesta estructural de los revestimientos en las condiciones in situ, y 3) determinar la viabilidad de la utilización de las fibras de acero como único refuerzo para el hormigón de las dovelas.

Los anillos de revestimiento del túnel de L9 están formados por 8 dovelas (7+K) de 350 mm de espesor que conforman un diámetro exterior de 11,6 m (Fig. 2). La configuración del ensayo se basaba en la aplicación de tres cargas puntuales en la zona de clave de un anillo (Fig. 2), las cuales se generaban mediante tres gatos hidráulicos planos colocados en el trasdós de las dovelas durante el proceso de prefabricación (Fig. 3). La carga máxima finalmente aplicada fue de 3.000 kN, suficiente para generar una significativa fisuración del hormigón en el ámbito cargado.

2). The test arrangement was based on the application of three point loads set at the crown of the ring (Fig. 2) that were applied by hydraulic jacks set on the back of the segments during the precast process (Fig. 3). The maximum load finally applied was 3000 kN, this being sufficient to cause significant cracking of the concrete in the loaded area.

The test section was formed by 15 concrete segment rings, which were only reinforced by 60 kg/m³ of steel fibres, 50 mm long by 1 mm diameter.

A large number of instruments were set internally and externally on both the loaded ring and adjacent rings to provide highly detailed recordings of the response of the structure to the different loading levels and combinations. The internal instruments consisted of total pressure cells and vibrating wire extensometers (Fig. 4a), which were fixed to light reinforcement which had been placed to this effect. The external instruments consisted of displacement transducers set in the joints to record joint movement (Fig. 4b) and vertical flexometers set in the cross-section of the tunnel to measure deformation.

The cracking patterns produced during the varying loading stages were meticulously recorded (Fig. 5). The cracking was mainly concentrated under the positions of the hydraulic jacks and reached a significant, maximum opening of 1.31 mm when only one jack was working with a force of 1500 kN.

The analysis of the results showed that the loaded ring barely transmitted loads to the adjacent rings and behaved in the manner of an arch under the effect of the concentrated loads, and determined the

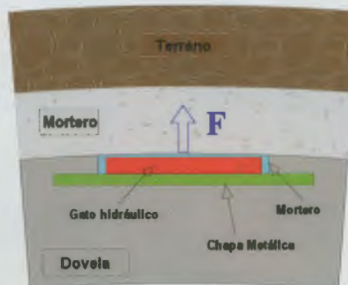


Fig. 3. Generación de cargas localizadas mediante gatos hidráulicos planos embebidos en el extradós de las dovelas/Generation of localized loads by flat hydraulic jacks set in the outer face of the segments

El tramo experimental estaba constituido por 15 anillos de dovelas de hormigón, las cuales estaban exclusivamente reforzadas mediante una cuantía de 60 kg/m^3 de fibras metálicas con extremos conformados, de 50 mm de longitud y 1 mm de diámetro.

Se dispuso de una gran cantidad de instrumentación interna y externa tanto en el anillo cargado como en los adyacentes, permitiendo registrar con un gran nivel de detalle la respuesta presentada por la estructura frente a los distintos niveles y combinaciones de carga aplicados. La instrumentación interna estaba formada por células de presión total y extensómetros de cuerda vibrante (Fig. 4a), la cual estaba sujeta a una leve armadura dispuesta a tal efecto. La instrumentación externa consistía en transductores de desplazamiento ubicados en las juntas a fin de registrar sus movimientos (Fig. 4b), y de flexímetros verticales ubi-

length of the scope of reaction of the arch supports against the soil. The soil-structure interaction was also seen to play a decisive role in the distribution of stress within the ring and, subsequently, in its structural response and where a tangential spring stiffness of $1/3$ the radial stiffness was seen to be best suited to the test recordings. It was also seen that the movements of the loaded rings were primarily caused by concentrated rotations in the longitudinal joints and in the cracked sections under the jacks.

3. Load analysis models

The optimization of the structural design process requires tools that can predict the structural response shown by a certain lining under its particular loading and boundary conditions. The many parameters affecting the same together with the inherent complexity of each one of these makes this task nigh on insurmountable when using simplified analytical models and, instead, requires the use of numerical simulation models.



Fig. 4. Imágenes de la instrumentación interna (a) y externa (b) dispuesta en el tramo experimental/Illustrations of internal (a) and external (b) instruments arranged in the test section



Fig. 5. Registro de la fisuración producida a lo largo de las diferentes etapas de carga aplicadas/Recording of cracking produced over the different loading stages

cados en la sección transversal del túnel a fin de medir su deformación.

Los patrones de fisuración que se iban produciendo a lo largo de las distintas etapas de carga también fueron meticulosamente registrados (Fig. 5). Las fisuras se concentraron principalmente bajo las posiciones de los gatos hidráulicos, alcanzando una significativa apertura máxima de 1,31 mm cuando actuaba un único gato con una fuerza de 1.500 kN.

El análisis de los resultados permitió observar que el anillo cargado prácticamente no transmitía carga a los anillos adyacentes y que presentaba un comportamiento local tipo arco bajo el efecto de las cargas concentradas, determinándose la longitud del ámbito de reacción de los apoyos de arco contra el terreno. Asimismo, se observó cómo la interacción terreno estructura tiene un rol determinante en la distribución de fuerzas en el anillo y, por tanto, en su respuesta estructural, comprobándose que una rigidez tangencial de 1/3 de la radial era la que mejor ajustaba las medidas experimentales. Por otra parte, se comprobó que los movimientos en el anillo cargado estaban causados principalmente por las rotaciones

On-site testing made it possible to identify those factors determining the structural response of the lining and those that should, subsequently, be included in a very precise manner. The strategy considered was based on the study of those modelling techniques that would allow the precise and individual reproduction of each of these factors, which could then be incorporated within a single model of the lining. In this way two models of the tunnel were developed to reproduce the on-site test - a flat 2D model and a 3D laminate finite element model (Fig. 6) - which would integrate the necessary techniques to reproduce: 1) the post-cracking behaviour of the steel fibre reinforced concrete; 2) the non-linear rotational response of the joints; 3) the non-linear behaviour with plastic deformation in the packing material in the joints between segments and; 4) soil-structure interaction [6].

The post-cracking behaviour of the steel fibre reinforced concrete (SFRC) was determined on the basis of experimental characterization based on four-point bending tests. Inverse analysis [7] was carried out on the basis of the load-deflection results in order to establish the tensile stress-crack opening behaviour of the SFRC employed. The soil-structure interaction was modelled by the Winkler hypothesis, using spring elements in the radial and tangential direction to the tunnel. The detachment of the joints was simulated by the use of joint elements with null tensile stiffness [8]. The packing material between the joints



Fig. 6. Modelos 3D de láminas y 2D de tensión plana empleados en la simulación del ensayo in situ/3D laminate and 2D flat tension models employed in the simulation of on-site testing

concentradas en las juntas longitudinales y en las secciones fisuradas bajo los gatos.

3. Modelos de análisis resistente

La optimización del proceso de diseño estructural requiere disponer de herramientas que permitan predecir la respuesta estructural que un determinado revestimiento presenta ante sus particulares cargas y condiciones de contorno. Los múltiples parámetros que la afectan junto con la complejidad propia de cada uno de ellos hacen que esta tarea sea prácticamente inabordable mediante modelos analíticos simplificados, requiriendo la utilización de modelos de simulación numérica.

La realización del ensayo in situ permitió identificar los fenómenos que determinan la respuesta estructural del revestimiento y que, por tanto, debían ser incluidos de forma muy exacta. La estrategia adoptada se basó en el estudio de aquellas técnicas de modelización que permitieran reproducir de forma cuidadosa cada uno de estos fenómenos, de forma aislada, para finalmente integrarlos en un único modelo del revestimiento. De esta forma, se desarrollaron dos modelos de túnel para reproducir el en-

showed a non-linear behaviour with plastic deformation which was characterized by a cyclic compression test.

The capacity of both these models to reproduce the real response was demonstrated on comparing the numerical results to the test recordings. The precision of the predicted displacements of the tunnel and the openings of the joints throughout the different loading stages backed up the reasoning, hypotheses and modelling techniques that had been adopted. The similarities between the numerical and the real cracking patterns demonstrated the suitability of the material model adopted to incorporate the contribution of steel fibres within the concrete (Fig. 7).

4. Deferred longitudinal behaviour of tunnel linings

The degree of three-dimensionality shown in the structural response of a concrete segment tunnel lining depends on their arrangement and the ensuing capacity to transfer tangential forces between rings. The majority of tunnel linings built in Spain have flat joints between rings (Fig. 1). This then means that the transfer of forces occurs through the contact elements (packers) set between adjacent rings, and where these are subsequently subject to shear and friction. As a result, the maximum tangential force that may be transferred will depend on the longitudinal force existing in the lining, which shall, in turn, condition the

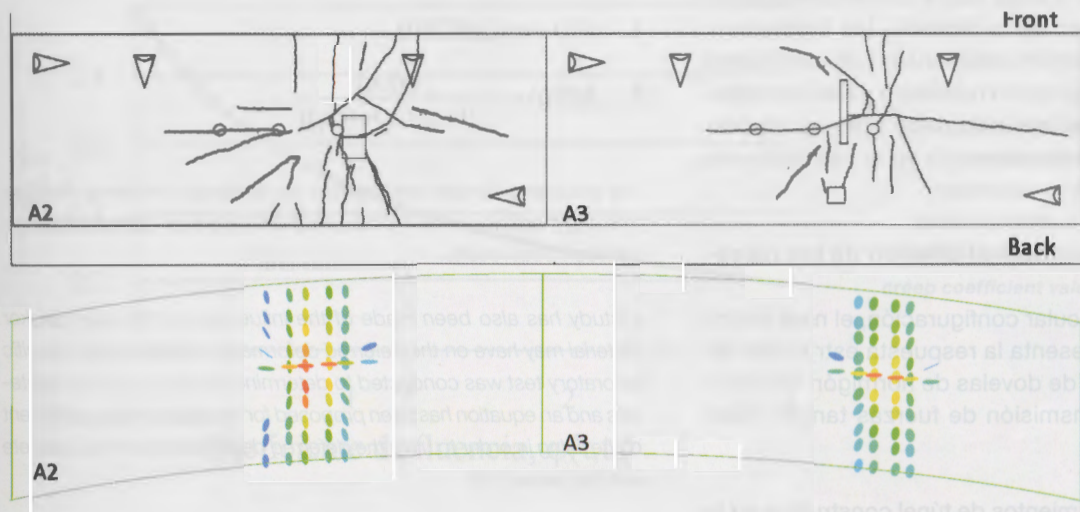


Fig. 7. Comparativo de la fisuración real registrada en el ensayo y de la obtenida numéricamente/ Comparison of the real cracking recorded during testing with that obtained numerically

sayo in situ, un 2D de tensión plana y un 3D de elementos finitos lámina (Fig. 6) que integraran las técnicas adecuadas para reproducir: 1) el comportamiento posfisuración del hormigón reforzado con fibras de acero, 2) la respuesta rotacional no lineal de las juntas, 3) el comportamiento no lineal con deformaciones remanentes presentado por el material de contacto de las juntas entre dovelas y 4) la interacción terreno-estructura [6].

El comportamiento postfisuración del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) se determinó mediante una campaña experimental de caracterización basada en ensayos de flexotracción de cuatro puntos. Partiendo de los resultados carga-flecha obtenidos, se realizó un análisis inverso [7] para determinar el comportamiento tensión-apertura de fisura del HRFA utilizado. La interacción suelo-estructura se modelizó mediante la hipótesis de Winkler, utilizando elementos muelle en las direcciones radial y tangencial al túnel. El despegue de las juntas se simuló mediante la utilización de elementos junta con una rigidez a tracción nula [8]. El material de contacto dispuesto en las juntas (*packers*) presenta un comportamiento no lineal con deformaciones remanentes que se caracterizó mediante un ensayo cíclico a compresión.

La contrastación de los resultados numéricos con las medidas experimentales demostró la capacidad de ambos modelos para reproducir la respuesta real. La precisión en la predicción de los desplazamientos del túnel y en las

degree of interaction between rings and the ensuing three-dimensional response of the structure.

The particular construction process employed by TBMs causes a permanent longitudinal force on the lining on generating the thrust and advance of the machine, while at the same time counteracting the earth and soil pressure on the cutter wheel at the excavation face. It is generally held by the literature on the subject that this force permanently remains in the lining [9, 10, 11]. However, if we consider the deferred deformations inevitably seen in the concrete, this hypothesis then proves somewhat unrealistic.

In order to clarify and establish the level of the longitudinal force remaining in the lining, a detailed study has been made of the construction process and the different mechanisms that may lead to the transfer of forces from the linings to the soil [12]. This theoretical analysis has shown the clear dependency that the remaining compressive stress has with respect to the longitudinal creep deformation of the lining. The structure compressed by the action of the TBM then undergoes a process of relaxation which leads to a progressive loss of longitudinal force with the passage of time. The analysis of the process has given rise to an analytical formula to predict the remaining compressive stress at any given moment of time t ($\sigma_c(t)$) in accordance with the stress initially applied by the TBM ($\sigma_c(t_0)$), the longitudinal creep coefficients ($\phi(t, t_0)$) and the ageing of the lining ($\chi(t, t_0)$) (Equations 1-2). In accordance with the proposed formula, the remaining compression factor (RCF) shows a rapid fall for small creep coefficient values, and a more gentle decrease as these progress (Fig. 8).

aberturas de las juntas a lo largo de los diferentes estadios de carga avaló la validez de la filosofía, las hipótesis y las técnicas de modelización adoptadas. Las similitudes entre los patrones de fisuración numérico y real corroboraron que el modelo material adoptado para incorporar la contribución de las fibras de acero en el hormigón era adecuado (Fig. 7).

4. Comportamiento longitudinal diferido de los revestimientos

De acuerdo con su particular configuración, el nivel de tridimensionalidad que presenta la respuesta estructural de un revestimiento a base de dovelas de hormigón depende de la capacidad de transmisión de fuerzas tangenciales entre sus anillos.

La mayoría de los revestimientos de túnel construidos en la península ibérica presentan una configuración plana en sus juntas entre anillos (Fig. 1). Esto supone que la transferencia de fuerzas se produce a través de los elementos de contacto ubicados en las juntas entre anillos adyacentes (packers), quedando estos solicitados a corte y fricción. En consecuencia, la fuerza tangencial máxima que podrán transmitir dependerá de la fuerza longitudinal existente en el revestimiento, condicionando el grado de interacción existente entre anillos y la consiguiente respuesta tridimensional de la estructura.

El particular proceso constructivo que utilizan las tuneladoras produce una fuerza longitudinal permanente sobre el revestimiento a fin de producir el impulso y avance de la máquina, así como contrarrestar la presión de tierras y agua que el frente de excavación ejerce sobre la rueda de corte. De forma general, en la bibliografía se considera que esta fuerza permanece de forma permanentemente en el revestimiento [9, 10, 11]. No obstante, si se tienen en cuenta las deformaciones diferidas que, seguro, experimenta el hormigón, esta hipótesis puede resultar poco realista.

A fin de esclarecer y determinar el nivel de fuerza longitudinal remanente en el revestimiento, se ha desarrollado un estudio detallado del proceso constructivo así como de los diferentes mecanismos que podían causar la transmisión de fuerzas del revestimiento hacia el terreno [12]. Este análisis teórico ha demostrado la clara dependencia que la tensión de compresión remanente presenta respecto de la deformación de fluencia experimentada en dirección longitudinal por el revestimiento. La estructura

1. $\sigma_c(t) = \sigma_c(t_0) \cdot RCF(t)$
2. $RCF(t) = 1 - \frac{\varphi(t, t_0)}{[1 + \chi(t, t_0) \varphi(t, t_0)]}$

The proposed formula was verified by numerical modelling through time and there was seen to be an excellent degree of correspondence between both results.

A study has also been made of the influence that the joint packer material may have on the deferred deformations observed. A specific laboratory test was conducted to determine the creep of these materials and an equation has been proposed for the global creep coefficient of the lining in order to unify the deferred deformations of the concrete and the packer [12].

5. Three-dimensional response of the lining

Tunnel linings tend to be subjected to a practically hydrostatic pressure profile that varies slightly throughout the length of the tunnel due to the variations in cover and hydrogeological conditions. This would seem to imply that two adjacent rings would present the same loading arrangement under the same boundary conditions and where the deformations would supposedly be similar to each other. However, the staggered arrangement of the sections used in segmental lining (Fig. 1) may create different deformation patterns among adjacent rings on account of the concentration of rotations in the longitudinal joints (Fig. 9), and cause relative radial displacements between the same. These displacements lead to tangential stress in the circumferential joints and give rise to structural interaction between the rings. A low level of interaction would give a similar response to that provided by an isolated ring, while a high level of interaction would provide a response closer to a continuous tube, thereby increasing the stiffness of the lining and the bending stresses present in the same (Fig. 9).

A theoretical analysis was made of the resistance factors involved in the three-dimensional response of tunnel linings, and where the most decisive factors were seen to be the stiffness of the surrounding soil, the existing longitudinal force and the degree of load imbalance (ratio between the vertical pressure at the crown and the horizontal pressure at the axis).

A complex three-dimensional finite element model was developed to faithfully reproduce the structural response of a real section of 11 rings set on section 4a of Line 9 of the Barcelona Metro [13]. This was formed by 17,820 laminate elements simulating the segments, 1,992 joint elements representing the connections between segments and

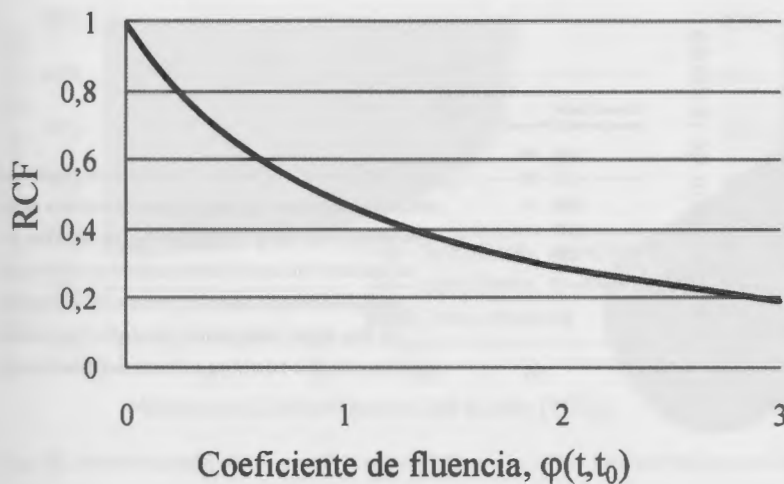


Fig. 8. Evolución del factor de compresión remanente (RCF) en función del valor del coeficiente de fluencia ($\varphi(t, t_0)$) (Coeficiente de envejecimiento constante)/Evolution of the remaining compression factor (RCF) according to creep coefficient value ($\varphi(t, t_0)$) (Constant ageing coefficient).

comprimida por la acción de la tuneladora experimenta un proceso de relajación que origina la progresiva pérdida de la fuerza longitudinal a medida que pasa el tiempo. El análisis de este mecanismo ha permitido determinar una formulación analítica para la predicción de la tensión de compresión remanente en un determinado instante de tiempo t ($\sigma_c(t)$) en base a la tensión inicialmente aplicada por la tuneladora ($\sigma_c(t_0)$), y a los coeficientes de fluencia longitudinal ($\varphi(t, t_0)$) y de envejecimiento del revestimiento ($\chi(t, t_0)$) (Eq. 1 y 2). De acuerdo con la formulación propuesta, el factor de compresión remanente (RCF) presenta un rápido descenso para valores pequeños del coeficiente de fluencia, decreciendo de forma más suave a medida que este avanza (Fig. 8).

$$1. \sigma_c(t) = \sigma_c(t_0) \cdot RCF(t)$$

$$2. RCF(t) = 1 - \frac{\varphi(t, t_0)}{[1 + \chi(t, t_0) \varphi(t, t_0)]}$$

Un modelo numérico de análisis evolutivo ha permitido realizar la contrastación de la formulación propuesta, obteniendo un excelente nivel de adecuación entre ambos resultados.

Además, también se ha estudiado la influencia que las deformaciones diferidas experimentadas por el material de contacto de las juntas (packers) podía presentar. Se ha realizado un ensayo específico de laboratorio para determinar la fluencia de estos materiales y se ha propuesto

rings and 62,040 spring elements representing the soil-structure interaction. The main objective of the model was to ascertain the conditions under which significant three-dimensional effects occur and to analyse the resulting consequences of ignoring these in the design process.

The results of the numerical model showed that the ring coupling effects led to a reduction in the deformation of the lining and an increase in the bending stress with respect to the hypothesis of an isolated ring. These effects were seen to increase noticeably with any reduction in the stiffness of the surrounding soil and/or increase in unbalanced loading.

A parametric analysis made it possible to define the conditions under which the stiffness of the surrounding soil and the unbalanced loading would have a significant effect on the deformation and the bending stress in the structure (greater than 10% with respect to the results of the isolated ring under the same conditions, Fig. 10). It was noted that the coupling effects only had a significant influence in soft ground conditions (with a deformation modulus of less than 150 Mpa) and under highly unbalanced loading [13].

The non-linear analysis of the material showed that any failure to consider the coupling effects during the design process could lead to the appearance of cracks in the segments but would not encompass any danger of collapse of the structure. It is then possible to state that the use of an isolated stiff ring in the design process serves as a simplified form of analysis that makes it possible to establish the upper limit of the bending stresses that arise when the structure presents coupling effects.

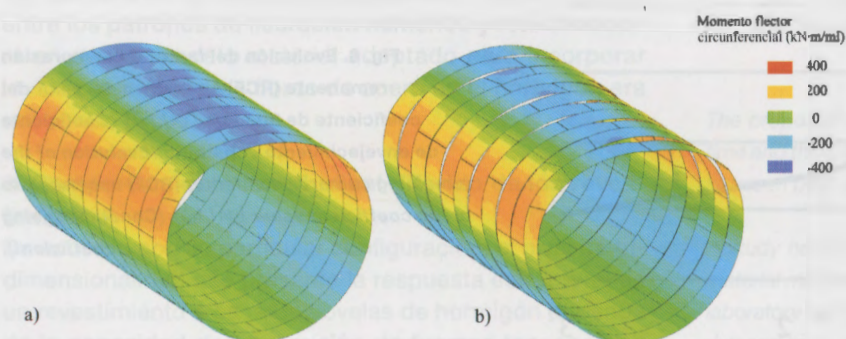


Fig. 9. Deformación y momentos flectores circunferenciales obtenidos en un mismo caso considerando (a) y obviando (b) los efectos de acoplamiento entre anillos/Deformation and circumferential bending moments obtained in the same tube when considering (a) and ignoring (b) the coupling effects between rings

una formulación para el coeficiente global de fluencia del revestimiento con el fin de unificar las deformaciones diferidas del hormigón y del packer [12].

5. Respuesta tridimensional del revestimiento

Los revestimientos de túnel suelen estar sometidos a un perfil de presiones prácticamente hidrostático que va variando levemente a lo largo de la traza del túnel debido a las variaciones de cobertura y de condiciones hidrogeológicas. Este hecho genera que dos anillos adyacentes presenten el mismo esquema de carga en las mismas condiciones de contorno, esperando, por consiguiente, deformaciones similares en los mismos. En realidad, la configuración de piezas al tresbolillo utilizada en los revestimientos de dovelas (Fig. 1) puede generar patrones de deformación diferentes entre anillos adyacentes por la concentración de rotaciones en las juntas longitudinales (Fig. 9), originando desplazamientos radiales relativos entre ellos. Estos desplazamientos producen una sollicitación tangencial de las juntas circunferenciales, activando los mecanismos de interacción estructural entre anillos. Un bajo grado de interacción comportará una respuesta similar a la ofrecida por un anillo aislado, mientras que un elevado grado de interacción comportará una respuesta cercana a la de un tubo continuo, incrementando la rigidez del revestimiento y los esfuerzos de flexión presentados en él (Fig. 9).

Se realizó un análisis teórico de los mecanismos resistentes involucrados en la respuesta tridimensional de los reves-

6. Conclusions

The research carried out directly contributes to the improved knowledge of the structural response of precast concrete segmental tunnel linings. The undertaking of an innovative on-site test revealed the main factors governing the behaviour of this type of linings.

This has made it possible to produce enhanced numerical modelling techniques based on the individualized reproduction of these factors and their subsequent incorporation within a single tunnel model. The excellent results obtained in the on-site test simulation have validated the model, which has since been satisfactorily employed to analyse specific situations in different tunnels.

The analysis of the mechanisms of longitudinal load transfer have made it possible to establish the scope of the loss of longitudinal compression over time due to the creep of the lining. This factor conditions the capacity for longitudinal interaction, which decreases over time.

It has similarly been demonstrated that the coupling effect between rings may have an influence on the three-dimensional response of the linings and where indications have been given of the conditions under which these may arise and the possible consequences of any failure to consider these in the design stage.

Acknowledgements

The authors wish to express their gratitude to GISA and FCC Construcción SA for all the assistance provided for the research into the structural response of tunnel linings. **ROP**

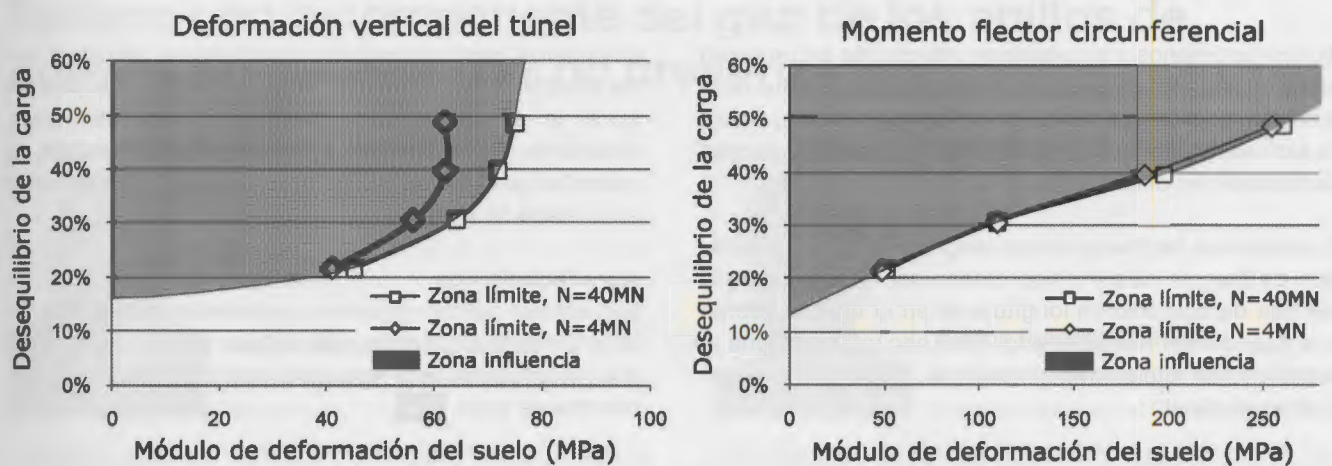


Fig. 10. Determinación de las condiciones de influencia de los efectos de acoplamiento para el caso analizado de la Línea 9/Area of influence of coupling effects in the cases analysed on Line 9

timientos de túnel, concluyendo que sus factores más determinantes deberían ser la rigidez del terreno envolvente, la fuerza longitudinal existente y el grado de desequilibrio de la carga (relación entre las presiones vertical en clave y horizontal en eje).

Un complejo modelo tridimensional de elementos finitos fue desarrollado a fin de reproducir de forma precisa la respuesta estructural de un tramo real de 11 anillos pertenecientes al tramo 4a de la línea 9 del Metro de Barcelona [13]. Este estaba formado por 17.820 elementos lámina reproduciendo las dovelas, 1.992 elementos junta para simular las conexiones entre dovelas y entre anillos y de 62.040 elementos muelles para considerar la interacción terreno-estructura. Los principales objetivos se basaban en determinar las condiciones en las cuales se producen efectos tridimensionales significativos, así como analizar las consecuencias de no considerarlos en el proceso de diseño.

Los resultados del modelo numérico mostraron que los efectos de acoplamiento entre anillos producen una reducción en la deformación del revestimiento y un incremento de los esfuerzos de flexión respecto a la hipótesis de anillo aislado. Estos efectos se incrementan sensiblemente en cuanto disminuye la rigidez del terreno envolvente y/o crece el desequilibrio de la carga aplicada.

Un análisis paramétrico permitió definir las condiciones de rigidez del terreno envolvente y de desequilibrio de la carga que producen una afectación significativa sobre la

deformación y los esfuerzos de flexión en la estructura (mayores al 10 % respecto a los resultados del anillo aislado en las mismas condiciones, Fig. 10). Se observa que los efectos de acoplamiento solo presentan una influencia significativa para condiciones de terreno blando (con módulos de deformación inferiores a 150 MPa) y desequilibrios de carga altos [13].

El análisis no lineal por el material reveló que la no consideración de los efectos de acoplamiento durante el proceso de diseño podría producir la aparición de fisuras en las dovelas, pero no debería comportar un peligro de colapso para la estructura. Por ello, es posible afirmar que el empleo de un anillo aislado rígido en el proceso de diseño es la opción de análisis simplificado que permite obtener un límite superior adecuado para los esfuerzos de flexión acaecidos cuando la estructura presenta efectos de acoplamiento.

6. Conclusiones

La investigación desarrollada ha supuesto una contribución directa en el conocimiento de la respuesta resistente de los revestimientos de túnel realizados a base de dovelas prefabricadas de hormigón. La realización de un innovador ensayo in situ evidenció los principales fenómenos que gobiernan el comportamiento de este tipo de revestimientos.

Ello ha permitido poner a punto técnicas de simulación numérica basadas en la reproducción individualizada de

dichos fenómenos y su posterior integración en un único modelo de túnel. Los excelentes resultados obtenidos en la simulación del ensayo in situ han validado el modelo, el cual ha sido satisfactoriamente usado para analizar situaciones particulares en diferentes túneles.

El análisis de los mecanismos longitudinales de transmisión de fuerzas ha permitido determinar el alcance de la pérdida de compresión longitudinal en el tiempo debido a la fluencia del revestimiento. Este hecho condiciona la capacidad de interacción longitudinal, que disminuye con la edad de túnel.

Finalmente, se ha puesto de manifiesto la influencia que los efectos de acoplamiento entre anillos pueden presentar en la respuesta tridimensional de los revestimientos, detallando las condiciones en que se pueden producir, así como las posibles consecuencias de su no consideración en la etapa de diseño.

Agradecimientos

Los autores quieren mostrar su agradecimiento a GISA y a la empresa FCC Construcción SA por todo el apoyo dado a la investigación de la respuesta estructural de los revestimientos de túnel. **ROP**

Notas

[1] Muir Wood, A.M., 1975. The circular tunnel in elastic ground. *Géotechnique*, 25(1), 115-127.

[2] Blom, C.B.M., 2002. Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils. PhD Thesis. Technische Universiteit Delft.

[3] Teachavorasinskun, S., Chub-uppakarn, T., 2010. Influence of segmental joints on tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, 490-494.

[4] Molins, C., Mari, A., Aguado, A., (2005), Proyecto de prueba de carga del revestimiento del túnel a base de dovelas. III Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural.

[5] Molins, C., Arnau, O., (2011), Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 1: Test configuration and execution. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Volumen 26, p. 764-777.

[6] Arnau, O., Molins, C., (2011), Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 2: Numerical simulation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Volumen 26, p. 778-788.

[7] Roelfstra, P.E., Wittmann, F.H., 1986. Numerical Method to link Strain Softening with failure of Concrete. Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete. Ed. F.H.Wittmann, Elsevier Science, 163-175.

[8] Plizzari, G.A., Tiberti, G., 2006. Steel Fibers as Reinforcement for Precast Tunnel Segments. *Proceedings of the ITA-AITES 2006 World Tunnel Congress and 32nd ITA General Assembly*. 6 pp.

[9] Blom, C.B.M., van der Horst, E.J., Jovanovic, P.S., 1999. Three-dimensional Structural Analyses of the Shield-Driven "Green Heart" Tunnel of the High-Speed Line South. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 1, N° 2, 217-224.

[10] Klappers, C., Grübl, F., Ostermeier, B., 2006. Structural analyses of segmental lining – coupled beam and spring analyses versus 3D-FEM calculations with shell elements. *Proceedings of the ITA-AITES 2006 World Tunnel Congress, Safety in the Underground Space*, 6 pp.

[11] Mo, H.H., Chen, J.S., 2008. Study on inner force and dislocation of segments caused by shield machine attitude. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23, 281-291.

[12] Arnau, O., Molins, C., Blom, C.B.M., Walraven, J.C., (2012), Longitudinal Time-Dependent response of segmental tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volumen 28, p. 98-108.

[13] Arnau, O., Molins, (2012), Three dimensional structural response of segmental tunnel linings. *Engineering Structures*, Volumen 44, p.210-221.